

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА СВОЙСТВ ВОДЫ И
ВОДЯНОГО ПАРА ПО СИСТЕМЕ УРАВНЕНИЙ IAPWS-IF97
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ СХЕМ ТЭС**

**DEVELOPMENT OF ALGORITHM FOR CALCULATING
PROPERTIES OF WATER AND STEAM ON IAPWS-IF97
EQUATION SYSTEM FOR MODELING THERMAL SCHEMES
HPP**

Селезнев Е. С., Худяков П. Ю.

Уральский федеральный университет, Екатеринбург,
seleznev-ekb@mail.ru

Seleznev E. S., Khudyakov P. Yu.

Ural Federal University, Yekaterinburg

Аннотация: В работе рассмотрен процесс разработки алгоритма расчета свойств воды и водяного пара на основе действующей формуляции IAPWS-IF97 для использования полученных данных в автоматизированных расчетах при моделировании тепловых схем. Рассмотрены основные уравнения для вычисления термодинамических параметров воды и водяного пара.

Abstract: In this paper, developing an algorithm for calculating the properties of water and steam on current formulation of IAPWS-IF97 for use the obtained data in automated calculations in the simulation of heat schemes are considered. The basic equations for calculating the thermodynamic parameters of water and water vapor are considered.

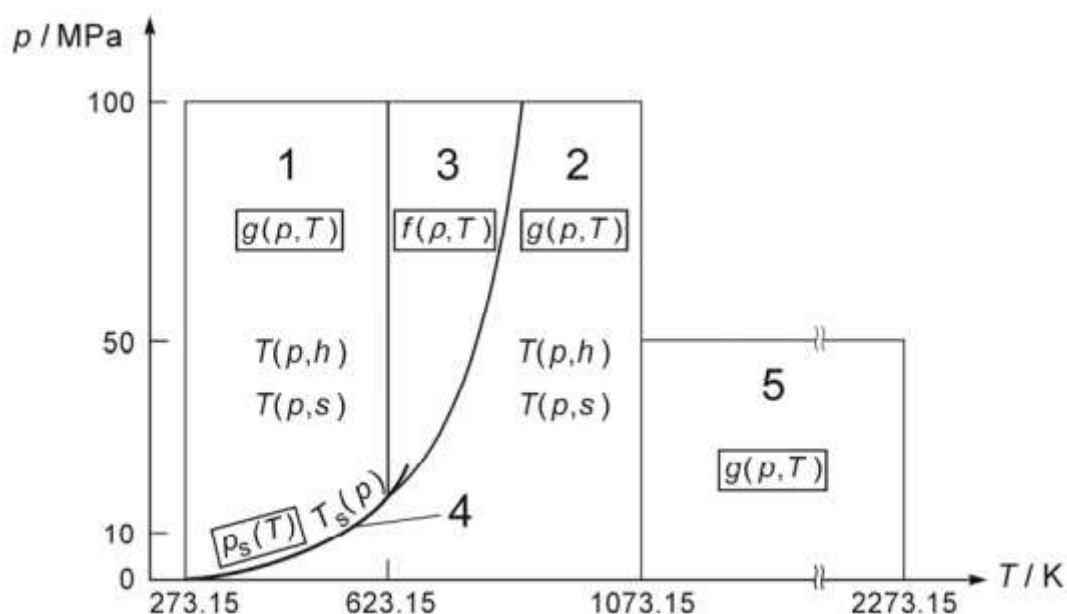
Ключевые слова: IAPWS-IF97; свойства воды и водяного пара; тепловые схемы.

Key words: IAPWS-IF97; water and steam properties; heat scheme.

Оценка и повышение энергетической эффективности новых строящихся ТЭС и оптимизация параметров работы существующих энергоустановок невозможна без комплексного исследования всей тепловой схемы. Процесс ручного расчета на основе существующих методик занимает значительное время и не позволяет использовать методы оптимизации. Для автоматизации процесса расчета тепловых схем необходима разработка программного комплекса сочетающего методы термодинамического анализа и математического аппарата оптимизации результатов моделирования.

Для выполнения расчета тепловых схем используются данные о характеристиках воды и водяного пара, которые также необходимо рассчитывать автоматически. Целью представленной работы является разработка алгоритма расчета с использованием действующей формуляции IAPWS-IF97 [1]. Следует отметить, что точность уравнений в актуальных ревизиях IAPWS-IF97 находится на довольно высоком уровне. Так, например, максимальное отклонение из всех функций при счете с одинарной точностью составляет величину в $2,3 \cdot 10^{-2}$ кДж/кг энтальпии [2].

Структура формуляции состоит из набора уравнений для различных областей. Области применения уравнений представлены на рисунке [1].



Области применения уравнений IAPWS-IF97

Группа основных уравнений состоит из пяти равенств: области 1, 2, 5 описываются фундаментальными уравнениями для энергии Гиббса $g(p, T)$; область 3 описывает фундаментальное уравнение для энергии Гельмгольца $f(\rho, T)$; линия насыщения описывается уравнением $p_s(T)$.

Основные уравнения для всех областей рассмотрены в первой части своей работы Александровым А. А. [3].

Основное уравнение для первой области – уравнение для удельной энергии Гиббса:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^{34} n_i (7,1 - \pi)^{I_i} (\tau - 1,222)^{J_i} \quad (1)$$

Здесь, приведенные давление и температура обозначены символами π и τ соответственно. Указаны параметры отнесения. Значения коэффициентов и показателей степени приводятся в таблице. По соглашению о принятии в тройной точке значений удельных внутренней энергии и энтропии жидкости, равных нулю, были отрегулированы коэффициенты n_3 и n_4 . Из основного уравнения для первой области и дифференциальных уравнений термодинамики также могут быть получены все термодинамические свойства воды.

Основное уравнение для второй области – разделенное на две части (идеально-газовую и реальную) уравнение удельной энергии Гиббса:

$$\frac{g(p, T)}{RT} = \gamma(\pi, \tau) = \gamma^0(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (2)$$

Формулы для идеально-газовой части (3) и для реальной (4):

$$\gamma^0 = \ln \pi + \sum_{i=1}^9 n_i \tau^{J_i^0} \quad (3)$$

$$\gamma^r = \sum_{i=1}^{43} n_i \pi^{I_i} (\tau - 0,5)^{J_i} \quad (4)$$

Введены такие же обозначения, как и для первой области и, также, отрегулированы коэффициенты.

Основное уравнение для третьей области – уравнение удельной энергии Гельмгольца:

$$\frac{f(\rho, T)}{RT} = \phi(\delta, \tau) = n_1 \ln \delta + \sum_{i=2}^{40} n_i \delta^{I_i} \tau^{J_i} \quad (5)$$

Данное уравнение в точности воспроизводит значения параметров критической точки.

Существует группа и дополнительных уравнений для этих областей. Она позволяет избежать итеративных вычислений. Эти дополнительные уравнения приведены Александровым А. А. во второй части своей работы [4].

Таким образом, после проведенного анализа документов, регламентирующих расчет свойств воды и водяного пара, можно сделать вывод, что разработка алгоритма вычисления сводится к определению области *PT*-диаграммы (рисунок) по введенным значениям давления и температуры. После этого выбирается соответствующее уравнение, по которому производится расчет всех необходимых параметров. Для современных персональных компьютеров и вычислительных комплексов, время, затраченное на вычисление полинома, будет незначительным и позволит автоматизировать часть рутинной работы при расчете схем.

Список использованных источников

1. Revised Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 // The International Association for the Properties of Water and Steam. URL: <http://www.iapws.org/relguide/IF97-Rev.pdf> (дата обращения: 20.10.2017).
2. Александров А. А. Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 3. Оценка точности величин. Сравнение с IFC-67 // Теплоэнергетика. 1999. № 1. С. 67–70.
3. Александров А. А. Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 1. Основные уравнения // Теплоэнергетика. 1998. № 9. С. 69–77.
4. Александров А. А. Система уравнений IAPWS-IF97 для вычисления термодинамических свойств воды и водяного пара в промышленных расчетах. Ч. 2. Дополнительные уравнения // Теплоэнергетика. 1998. № 10. С. 64–72.